

## Badanie cech mechanicznych porowatego gipsu<sup>a</sup>

Jakub Gontarz, Jerzy Podgórski

*Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,  
e-mail: j.gontarz@pollub.pl, j.podgorski@pollub.pl*

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań mechanicznych porowatego gipsu. Materiał do badań pozyskano z płyt gipsowych Pro-Monta o grubości 100mm. Wykonano badania ściskania próbek sześciennych, na podstawie których określono wartość wytrzymałości na ściskanie, współczynnik Poissona i moduł Younga. Wytrzymałość na rozciąganie określono na podstawie próby trójpunktowego zginania beleczki o przekroju prostokątnym. Wyznaczono także współczynniki tarcia powierzchni wygładzonej próbki wyciętej z płyty Pro-Monta oraz surowej powierzchni (po przecięciu płyty) o powierzchnię podkładki wykonanej z płyty pilśniowej. Porowatość materiału próbek określono standardową metodą normową. Wartości parametrów mechanicznych materiału mogą być przydatne w próbach modelowania zjawisk zniszczenia i odkształcenia materiału podejmowanych metodami analitycznymi a także numerycznymi.

**Słowa kluczowe:** Cechy mechaniczne gipsu, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie moduł Younga, współczynnik Poissona, gips porowaty

### 1. Wstęp

W Katedrze Mechaniki Budowli (KMB) Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej (WBIA PL) od lat prowadzone są prace dotyczące numerycznego modelowania zjawisk pękania materiałów kruchych takich jak skały naturalne oraz sztuczne np. beton i inne kompozyty tworzone na bazie cementu oraz kompozyty na bazie żywic. W ramach tych badań teoretycznych niezbędne są także testy laboratoryjne, których wyniki służą do weryfikacji wyników uzyskanych metodami numerycznymi oraz kalibracji parametrów modelu numerycznego. W latach 2013-14 podjęto prace nad numeryczną symulacją znanego od wielu lat testu laboratoryjnego tzw. próby brazylijskiej, która stosowana jest bardzo często do uzyskania wytrzymałości na rozciąganie materiałów kruchych. Popularność tej próby wynika z pewnością z jej prostoty i łatwości pozyskania próbek walcowych wycinanych bezpośrednio z rdzeni odwiertów geologicznych, bo stan naprężeń w ściskanym na pobocznicę walca dalece odbiega od jednorodnego stanu wymaganego do uzyskania wartości krytycznej naprężenia, które interpretujemy jako wytrzymałość na rozciąganie. Wytrzymałość uzyskana w ten sposób, nazywana jest zatem wytrzymałością na rozłupywanie. Szczegółowe rozważania dotyczące tego stanu są ciągle aktualnym tematem badań [1,2,3,4,5] a także były przedmiotem publikacji autorów [6].

Precyzyjna symulacja numeryczna testu brazylijskiego wymaga poznania mechanicznych własności materiału, których zwykle nie dostarczają producenci elementów budowlanych ze względu na ich małą przydatność w praktyce projektowej i wykonawczej. Konieczne więc były prace laboratoryjne prowadzące do wyznaczenia wartości potrzebnych

<sup>a</sup> Opisane badania zostały wykonane w ramach Funduszu Statutowego Katedry Mechaniki Budowli WBIA PL, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP.

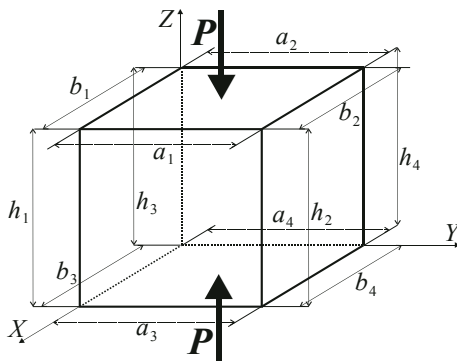
w symulacjach parametrów. W celu unikania efektów wywołanych niejednorodnością materiału, co ma duży wpływ na punkt inicjacji zniszczenia oraz kierunek propagacji szczelin, wybrano materiał charakteryzujący się dużą jednorodnością oraz posiadający cechy materiału kruchego tzn. znacznie większą wytrzymałością na ściskanie w stosunku do wytrzymałości na rozciąganie. Wyniki otrzymane z analiz prowadzonych metodami analitycznymi, mających na celu określenie punktu inicjacji szczelin w próbce brazylijskiej, wskazywały na wybór materiału o stosunkowo niewielkim stosunku  $\eta = R_c/R_t$  gdzie  $R_c$  oznacza wytrzymałość na ściskanie a  $R_t$  wytrzymałość na rozciąganie [6], co pozwala najwyraźniej zauważyć wpływ niejednorodnego pola naprężeń na lokalizację punktu inicjacji szczeliny.

Takimi własnościami charakteryzuje się gips i w szczególności gips spieniony występujący w bloczkach gipsowych Pro-Monta. Przemysłowy charakter produkcji tych elementów zapewniał potrzebną jednorodność i powtarzalność ich cech mechanicznych. Ze względu na możliwość wykonania jak największych próbek wybrano płyty Pro-Monta o grubości 100 mm. Z płyt zostały wycięte próbki walcowe, sześciennie i prostopadłościenne (belecзки), które poddano próbom w Laboratorium Budownictwa WBiA PL. Wyniki testów laboratoryjnych i otrzymanych w ich wyniku wartości niezbędnych w symulacjach stałych materiałowych są przedmiotem dalszej części prezentowanej pracy.

Kompleksowe badania właściwości gipsu przedstawione są w monografii S. Klina [7].

## 2. Próba jednoosiowego ściskania próbek sześciennych

W celu ustalenia wytrzymałości na ściskanie oraz modułu Younga i współczynnika Poissona dla spienionego gipsu, wykonano podstawowe badanie w jednoosiowym stanie naprężenia. Do badania użyto czterdziestu próbek sześciennych o nominalnym wymiarze boku 100 mm, wymiary próbek oraz uzyskane w wyniku testu laboratoryjnego wartości przedstawione są w Tabeli 1. W czasie badania rejestrowano odkształcenia próbek za pomocą systemu optycznego Aramis oraz odpowiadające im wartości sił za pomocą komputerowego systemu sterującego maszyną wytrzymałościową MTS 647.



Rys. 1. Wymiary próbki sześciennych. Wymiary uśrednione:  $a = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4)/4$ ,  $b = (b_1 + b_2 + b_3 + b_4)/4$ ,  $h = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4)/4$ .

W tabeli oznaczono  $a, b, h$  – uśrednione wymiary próbek zgodnie z Rys. 1;  $A$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki:  $A = a \times b$ ;  $P$  – maksymalna siła zarejestrowana przez system MTS;  $R_c$  – wytrzymałość na ściskanie obliczona na podstawie wzoru:  $R_c = P/A$ ;  $E$ ,  $\nu$  – moduł Younga i współczynnik Poissona wyznaczone zgodnie z procedurą opisaną w punkcie 3.

Tabela 1. Wymiary próbek i wyniki otrzymane w próbie jednoosiowego ściskania

Nr	Próbka	$H$ [mm]	$a$ [mm]	$b$ [mm]	$A$ [cm <sup>2</sup> ]	$P$ [kN]	$R_c$ [MPa]	$\kappa$ [kN/mm]	$E$ [MPa]	$\nu$ [-]
1	1a	100,04	101,46	101,36	102,84	54,6313	5,3123	60,0025	583,69	0,143
2	1b	100,27	100,22	100,24	100,46	47,6456	4,7426	58,4623	583,47	0,203
3	1c	100,23	102,01	101,10	103,13	48,8671	4,7383	58,9248	572,68	
4	1d	100,24	100,69	100,43	101,12	47,3383	4,6816	58,2799	577,74	
5	2a	100,12	100,60	99,95	100,55	48,9719	4,8702	56,8138	565,70	0,160
6	2b	99,99	101,49	100,87	102,37	59,7651	5,8383	61,8598	604,24	0,183
7	2c	100,19	101,11	100,77	101,89	49,1993	4,8286	59,4367	584,44	
8	2d	100,43	100,49	100,74	101,23	57,6615	5,6963	60,2631	597,91	0,235
9	3a	100,45	99,90	100,01	99,90	56,3096	5,6363	60,8156	611,49	0,143
10	3b	100,42	99,96	100,09	100,04	57,7908	5,7765	60,7018	609,29	0,203
11	3c	100,10	100,49	100,56	101,05	58,2428	5,7637	60,2600	596,95	
12	3d	100,09	100,79	100,89	101,68	57,2997	5,6352	61,3278	603,69	
13	4a	100,22	100,75	101,59	102,35	55,3732	5,4103	60,4556	591,98	
14	4b	100,22	100,30	99,98	100,28	48,113	4,7979	56,2413	562,05	
15	4c	100,22	101,04	101,72	102,78	58,0244	5,6453	61,4581	599,24	
16	4d	100,29	100,88	100,90	101,79	57,7448	5,6731	52,6260	518,50	
17	5a	100,22	101,75	101,48	103,25	54,0275	5,2328	60,1677	584,01	
18	5b	100,07	99,67	100,13	99,80	54,8948	5,5005	59,6595	598,18	
19	5c	100,06	100,64	100,86	101,51	57,6449	5,6790	60,5804	597,19	
20	5d	100,03	100,02	100,09	100,11	52,9582	5,2903	59,4834	594,40	
21	6a	100,16	100,07	100,22	100,28	44,5471	4,4423	55,5827	555,13	
22	6b	100,35	99,09	99,70	98,80	45,9741	4,6534	56,8489	577,41	
23	6c	100,33	99,13	99,69	98,82	46,905	4,7466	57,7304	586,11	
24	6d	100,25	100,41	100,63	101,04	59,9373	5,9320	60,4939	600,19	
25	7a	100,26	100,98	100,61	101,60	57,9099	5,6999	59,7101	589,25	
26	7b	100,21	101,84	101,32	103,18	54,196	5,2525	58,3538	566,72	
27	7c	100,33	99,88	100,04	99,92	44,7605	4,4797	58,2177	584,60	
28	7d	99,97	100,96	101,94	102,92	56,6436	5,5037	59,4400	577,34	
29	67a	100,25	101,70	101,06	102,78	51,6267	5,0229	58,1805	567,47	
30	67b	100,00	100,99	100,99	101,98	57,7809	5,6658	59,4427	582,87	
31	67c	100,20	101,20	101,29	102,50	59,3716	5,7922	60,3990	590,43	
32	67d	100,27	100,48	100,35	100,82	59,5126	5,9028	60,4492	601,17	0,237
33	A4a	100,19	100,90	100,51	101,41	54,5476	5,3787	59,0725	583,61	
34	A4b	100,18	100,39	100,48	100,87	46,2004	4,5801	56,8066	564,14	
35	A4b	100,16	99,99	100,72	100,71	47,5223	4,7185	57,6251	573,08	
36	A4c	100,27	101,04	100,81	101,86	43,2683	4,2478	58,7048	577,88	
37	z1a	100,12	100,43	100,16	100,59	53,806	5,3491	59,1946	589,21	
38	z1b	100,13	100,62	101,30	101,93	59,0854	5,7966	61,2341	601,54	
39	z1c	100,42	100,02	100,00	100,03	58,6244	5,8610	60,2812	605,18	
40	z1d	100,09	101,01	100,55	101,57	53,4321	5,2607	59,1911	583,30	

Rys. 2 przedstawia zdjęcie próbki w trakcie badania na maszynie MTS z zastosowaniem systemu Aramis do pomiaru odkształceń.

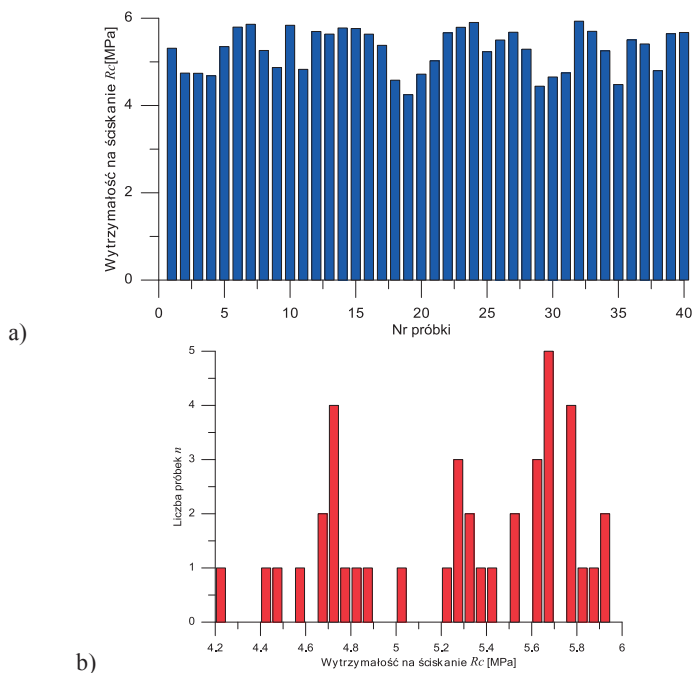


Rys. 2. Próbką kostkowa badana Rysunek maszynie MTS 647 wyposażonej w system Aramis do pomiaru odkształceń

Rysunek 3 przedstawia rozkład wartości  $R_c$  wyznaczonych dla poszczególnych próbek oraz histogram zbioru  $R_c$ . Wartość średnia wytrzymałości otrzymana w tych badaniach

wynosi:  $\bar{R}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ci} = 5,2759 \text{ MPa}$ , odchylenie standardowe  $\sigma_c = 0,4885 \text{ MPa}$ , czyli

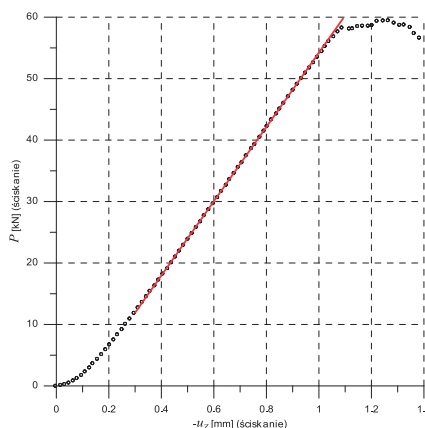
9,26%  $\bar{R}_c$  a mediana zbioru  $\bar{\bar{R}}_c = 5,3639 \text{ MPa}$ . Obserwacja histogramu wskazuje, że rozkład wytrzymałości na ściskanie wyraźnie odbiega od rozkładu normalnego.



Rys. 3. Wartości wytrzymałości na ściskanie dla poszczególnych próbek kostkowych (a) i histogram zbioru (b).

### 3. Sposób wyznaczania parametrów modelu liniowo sprężystego – modułu Younga i współczynnika Poissona

Wartości siły  $P$ , przyłożono monotonicznie z prędkością  $\sim 0,4 \text{ kN/s}$  do powierzchni górnej i dolnej próbki sześcienniej (Rys.1). Rejestrowane wartości siły oraz przemieszczeń pionowych ( $u_Z$ ) z maszyny MTS zostały skorelowane z wartościami odkształceń poziomych ( $\varepsilon_Y$ ) otrzymanych z systemu Aramis. Dane te posłużyły do sporządzenia wykresów przemieszczeń, z których jeden (dla próbki 67d) jest pokazany na Rys. 4. Zależność  $P(u_Z)$  została w środkowym obszarze obciążenia ( $0,3 \div 0,7 P_{max}$ ) aproksymowana liniowym równaniem:  $P = \alpha + \kappa u_Z$ , a współczynniki  $\alpha$  i  $\kappa$  zostały dobrane metodą najmniejszych kwadratów.



Rys. 4. Wykresy zależności  $P-u_Z$  (a) na podstawie pomiarów MTS, linią czerwoną zaznaczono prostą o równaniu  $P = \kappa u_Z + \alpha$ , aproksymującą dane doświadczalne.

Po przyjęciu założenia, że w próbce ściskanej panuje jednoosiowy i jednorodny stan naprężenia oraz jednorodny stan odkształcenia, otrzymamy:

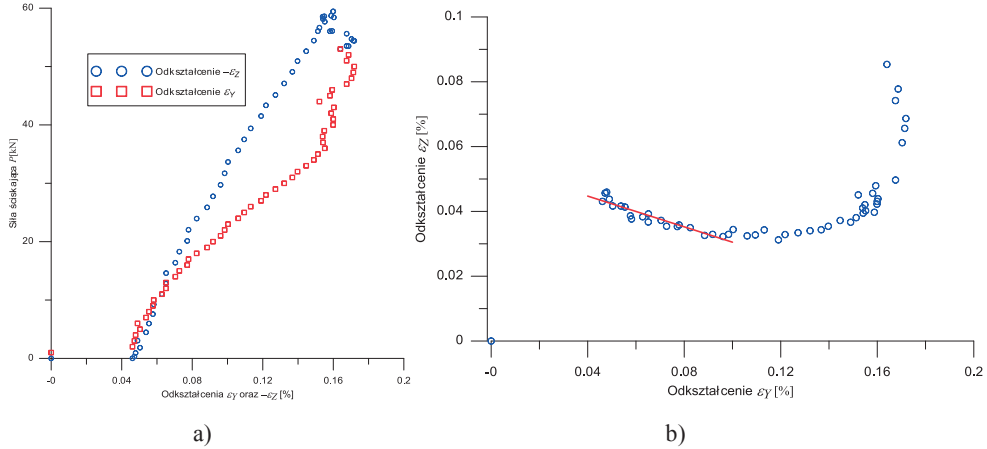
$$\sigma_Z = \frac{-P}{A}, \quad \varepsilon_Z = \frac{-u_Z}{h}, \quad \sigma_Z = E \varepsilon_Z \rightarrow E = \frac{Ph}{Au_Z} \rightarrow E = \frac{\kappa}{b}. \quad (1)$$

Wyniki obliczone wg tych równań przedstawione są w Tabeli 1. Wartość średnia modułu Younga przy ściskaniu wynosi  $\overline{E_c} = 584.84 \text{ MPa}$ , przy bardzo małym odchyleniu standardowym  $\sigma = 17,57 \text{ MPa}$ , co stanowi tylko 3%  $\overline{E_c}$ .

Na podstawie wyników otrzymanych z systemu Aramis, po ich korelacji z wynikami MTS, można sporządzić wykresy zależności  $P - \varepsilon_Z$  oraz  $P - \varepsilon_Y$ , (por. Rys. 5a) a także wykres  $\varepsilon_Z - \varepsilon_Y$  (por. Rys. 5b). Przy założeniu jednorodności materiału, jednoosiowego stanu naprężenia zależność ta przyjmuje postać liniową  $\varepsilon_Y = -\nu \varepsilon_Z$ , a stąd mamy współczynnik Poissona:  $\nu = -\varepsilon_Y / \varepsilon_Z$ . Wartości współczynników Poissona dla kilku badanych próbek pokazano w Tabeli 1.

Analiza wyników eksperymentów pokazanych na Rys. 5 wskazuje, że dla badanego materiału liniowe prawo można przyjąć w dość szerokim zakresie dla zależności  $\sigma_Z = E \varepsilon_Z$ , ale związek  $\varepsilon_Y - \varepsilon_Z$  znacznie odbiega od opisanego przez prawo Hooke'a. Wy tłumaczyć to można innym zachowaniem materiału porowatego przy ściskaniu i rozciąganiu spowodowanym propagacją szczelin wywołaną koncentracjami naprężeń wokół porów materiału,

naprężenia ściskające nie wywołują tak szybkich zmian w strukturze porowatego gipsu gdyż docisk i tarcie wewnętrzne mają tu korzystny wpływ na zachowanie materiału. Porowatość badanych próbek wynosiła ok. 67%, więc jej wpływ na odkształcenia poprzeczne oraz zależność  $P - \varepsilon_Y$  jest z pewnością znaczny.



Rys. 5. Wykresy zależności  $P - \varepsilon_Z$ ,  $\varepsilon_Y$  (a) na podstawie pomiarów systemem Aramis, kolorem czerwonym zaznaczono punkty wykresu  $\varepsilon_Y$  a niebieskim punkty wykresu  $\varepsilon_Z$ . Wykres (b) przedstawia zależność między odkształceniami  $\varepsilon_Y$  i  $\varepsilon_Z$ , linią czerwoną zaznaczono aproksymację liniową zależności  $\varepsilon_Y = -\nu \varepsilon_Z$ .

#### 4. Wyznaczanie wytrzymałości na rozciąganie przez trójpunktowe zginanie beleczek prostopadłościennych

Wyznaczanie wytrzymałości na rozciąganie materiałów kruchych przez test zginania beleczek jest jedną z najczęściej wykonywanych metod badania tej cechy materiału. Inne rodzaje testów stosowane do określenia wytrzymałości na rozciąganie, takie jak bezpośrednie rozciąganie próbek o kształtach walcowych są znacznie trudniejsze do wykonania a wyniki uzyskane mogą budzić większe zastrzeżenia ze względu na niejednorodny stan naprężenia w próbce. Wiele z tych metod opisane są w monografii S. Klina [7], wraz z analizą stanów naprężeń i nieliniowości materiału badanych próbek.

W badaniach wykonanych przez autorów wykorzystano prostopadłościenną próbkę o długości ok. 50 cm i wymiarach poprzecznych  $\sim 70 \times 100$  mm. Próbki zostały umieszczone w urządzeniu do badań o podporach walcowych położonych w odległości  $L=42$  cm (por. Rys. 6a) i obciążone w środku rozpiętości za pomocą maszyny wytrzymałościowej MTS 647. W trakcie badania rejestrowane były zarówno wartości siły nacisku jak też przemieszczenie punktu przyłożenia siły. Maksymalna wartość siły pomierzona w czasie badania stanowiła podstawę do wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie materiału próbki.

Przyjmując liniowy model konstytutywny materiału i założenie, że materiał kruchy przy rozciąganiu podlega liniowemu prawu konstytutywnemu aż do zniszczenia otrzymamy:

$$\sigma_{\max} = \frac{6M}{bh^2}, \quad M = \frac{1}{4} P_{\max} L, \quad \sigma_{\max} = \frac{3P_{\max} L}{2bh^2}, \quad R_t = \sigma_{\max}. \quad (2)$$

Tabela 2. Wymiary przekrojów poprzecznych próbek belkowych i wyniki otrzymane w próbie trójpunktowego zginania

Nr	Próbka	$h$ [mm]	$b$ [mm]	$A$ [cm <sup>2</sup> ]	$P$ [kN]	$R_t$ [MPa]	$\lambda$ [kN/mm]	$E$ [MPa]
1	1a	71,49	100,61	71,92	1,4702	1,8015	2,0373	1026,7
2	1b	71,61	100,25	71,79	1,2585	1,5423	2,1486	1081,0
3	1c	70,86	100,19	70,99	1,4461	1,8113	2,4642	1280,6
4	1d	70,43	100,18	70,55	1,2998	1,6481	1,4290	756,4
5	2a	69,98	100,18	70,11	1,2998	1,6691	1,6449	887,4
6	2b	69,92	100,55	70,30	1,1286	1,4464	2,0266	1092,1
7	2c	70,97	100,28	71,16	1,3440	1,6767	2,5308	1308,0
8	2d	70,86	100,28	71,05	1,1024	1,3795	1,4324	743,7
9	3a	70,04	100,34	70,27	1,2749	1,6319	1,8021	968,4
10	3b	72,38	100,47	72,72	1,2586	1,5066	2,0905	1016,6
11	3c	71,22	100,20	71,36	1,1828	1,4663	2,2410	1147,0
12	3d	70,67	100,08	70,73	1,3211	1,6651	2,1689	1137,3
13	4a	70,29	100,28	70,48	1,2691	1,6139	2,3625	1256,8
14	4b	71,50	100,22	71,66	1,3586	1,6705	2,3246	1175,3
15	4c	69,93	100,27	70,11	1,2240	1,5729	2,4287	1312,2
16	4d	71,47	100,26	71,66	1,2984	1,5973	2,1756	1101,0
17	5a	70,82	100,15	70,92	1,2311	1,5443	1,2740	663,5
18	5b	69,28	100,19	69,41	1,2094	1,5845	1,5818	879,4
19	5c	71,41	100,37	71,67	1,1720	1,4426	1,9723	999,5
20	5d	70,54	100,34	70,78	1,2860	1,6227	1,7816	936,9
21	6a	70,03	100,10	70,10	1,1589	1,4872	1,7384	936,6
22	6b	71,55	100,20	71,69	1,1715	1,4388	1,6138	814,4
23	6c	69,72	100,34	69,96	1,3489	1,7423	2,4751	1348,1
24	6d	70,83	100,10	70,90	1,2460	1,5634	1,8559	966,6
25	7a	70,12	100,32	70,34	1,3294	1,6979	2,6007	1392,7
26	7b	70,17	100,29	70,37	1,3235	1,6887	1,9324	1033,2
27	7c	70,17	100,17	70,28	1,3642	1,7428	1,6100	861,8
28	7d	70,93	100,27	71,12	1,1901	1,4865	1,9562	1012,8
29	8a	70,51	100,81	71,08	1,2752	1,6030	1,9083	1000,2
30	8b	70,86	100,36	71,11	1,2242	1,5307	1,8837	977,3
31	8c	70,50	100,31	70,71	1,3099	1,6554	2,3852	1257,1
32	8d	71,91	100,37	72,17	1,2537	1,5220	2,4588	1220,5
33	9a	70,69	100,81	71,26	1,2752	1,5951	2,4000	1248,6
34	9b	72,08	100,09	72,14	1,2242	1,4831	1,5673	774,5
35	9c	71,56	100,19	71,70	1,3099	1,6085	1,0106	509,8
36	9d	71,01	100,23	71,17	1,2537	1,5630	1,7767	917,1
37	10a	72,70	100,48	73,05	1,7312	2,0537	1,2107	580,8
38	10b	70,92	100,49	71,27	1,2001	1,4959	2,3594	1219,2
39	10c	69,68	100,03	69,70	1,3437	1,7429	2,3743	1299,5
40	10d	70,54	100,43	70,84	1,2028	1,5166	1,6335	858,5
41	11a	69,45	100,33	69,68	1,3465	1,7529	1,3431	740,2
42	11b	70,09	100,26	70,27	1,3108	1,6769	2,0598	1105,4
43	11c	71,32	99,98	71,31	1,0368	1,2844	1,8396	939,4
44	11d	69,79	100,28	69,98	1,3493	1,7406	2,5023	1360,0
45	15a	70,43	100,03	70,45	1,4839	1,8844	2,3137	1226,6
46	15b	69,60	100,00	69,60	1,3306	1,7305	1,9366	1063,9
47	15c	71,65	100,72	72,17	1,1610	1,4146	2,1460	1072,9
48	15d	69,97	100,29	70,17	1,1264	1,4452	1,9441	1048,1

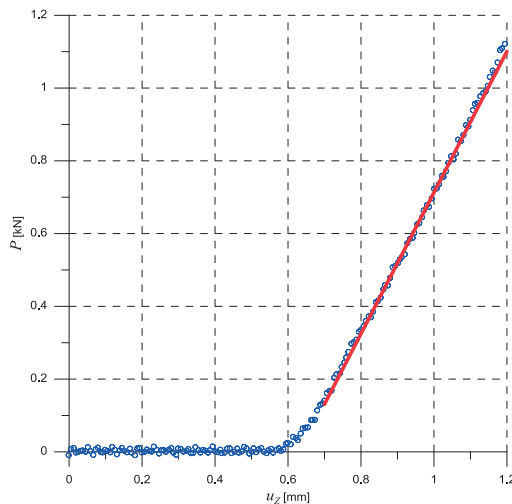


Rys. 6. Próbkę belkową w trakcie badania (a) i po zniszczeniu (b)

Wartość średnia wytrzymałości na rozciąganie wyniosła  $\overline{R_t} = 1,605 \text{ MPa}$ , odchylenie standardowe  $\sigma = 0,1604 \text{ MPa}$ , czyli 9,99%  $\overline{R_t}$ . Stosunek wytrzymałości  $\eta = \frac{R_c}{R_t} = 3,287$ .

Wyznaczono także wartość modułu Younga przy rozciąganiu zakładając liniową zależność między ugięciem belki i obciążeniem. Zastosowano równanie:

$E_t = \frac{\lambda L^3}{48J} \rightarrow E_t = \frac{\lambda L^3}{4bh^3}$ , gdzie  $\lambda$  jest współczynnikiem występującym w równaniu  $P = \lambda u_z + \beta$ , które opisuje liniową aproksymację środkowej części danych eksperymentalnych (por. Rys. 7),  $L$  – odległością między podporami próbki (Rys. 6a), a  $J$  momentem bezwładności przekroju poprzecznego próbki belkowej  $J = \frac{1}{12} bh^3$ .



Rys. 7. Zależność między przemieszczeniem punktu obciążenia i siłą działającą na środku belki. Czerwona linia aproksymująca dane eksperymentalne opisana jest równaniem  $P = \lambda u_z + \beta$ , dla próbki 2b,  $\lambda = 2,0266 \text{ kN/mm}$

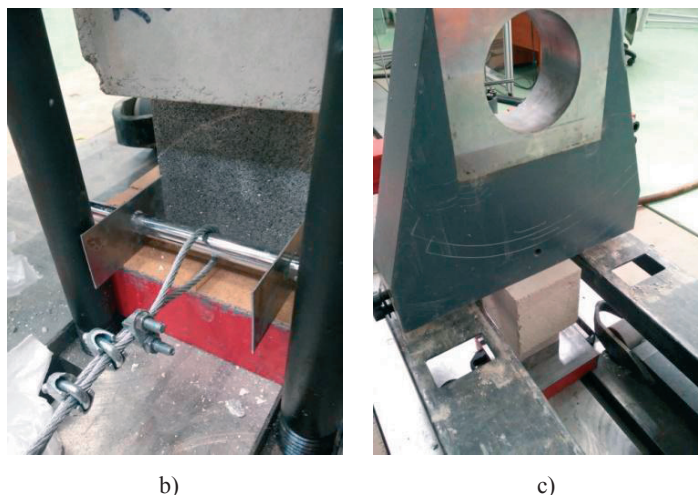
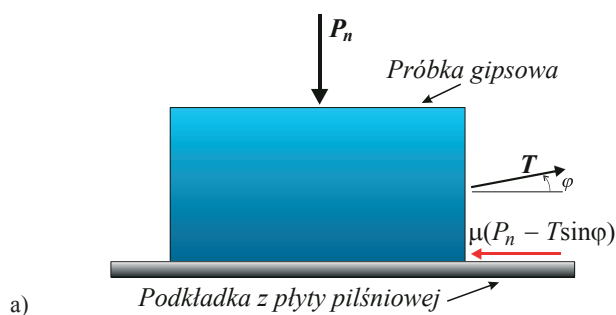
Wartość średnia modułu Younga przy rozciąganiu (zginaniu) wyniosła  $\overline{E_t} = 1032,4 \text{ MPa}$ , odchylenie standardowe  $\sigma = 210,02 \text{ MPa}$ , czyli 20,34%  $\overline{E_t}$ . Warto także



zauważyć, że moduł  $\overline{E}_t$  jest prawie dwukrotnie większy od modułu  $\overline{E}_c$ , który otrzymano w próbie jednoosiowego ściskania.

## 5. Wyznaczanie współczynnika tarcia

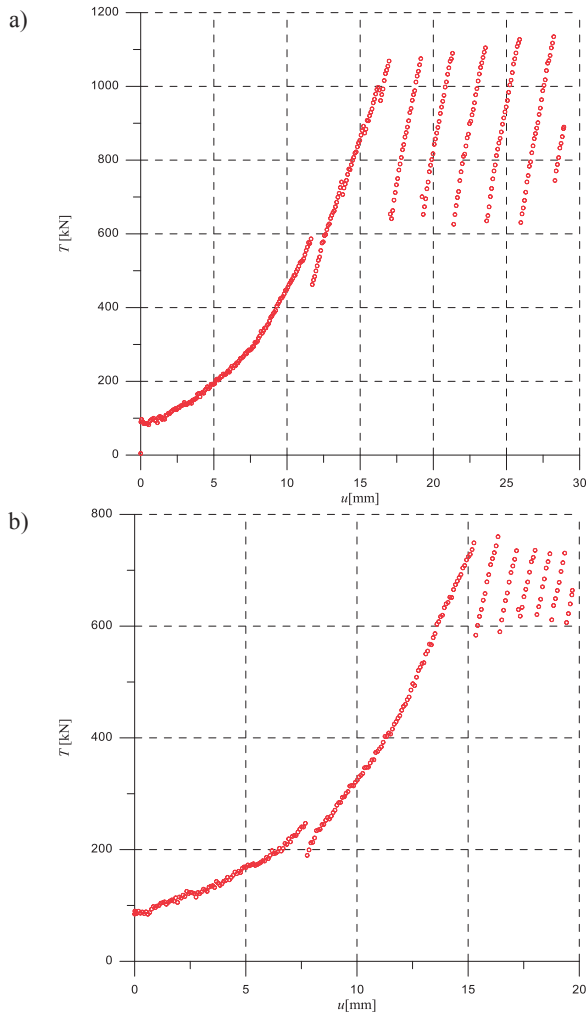
W celu określenia, jaki wpływ na naprężenia w próbce brazylijskiej ma kontakt między próbką a podkładką pilśniową, wykonano badania współczynników tarcia. Podkładki tego typu stosuje się w Laboratorium Budownictwa WBiA w urządzeniach do badania walców na rozłupywanie. Sześciennie próbki, których użyto do badania wytrzymałości na ściskanie, zostały przecięte na pół, tak, aby otrzymać szorstką powierzchnię. Urządzenie umożliwiające zbadanie współczynnika tarcia składało się ze stalowej obejmy połączonej przez system bloków z uchwytem maszyny wytrzymałościowej MTS. Próbki wkładano do obejmy i obciążano stalowym elementem o ciężarze 1,4 kN (por. Rys. 7).



Rys. 7. Badanie współczynnika tarcia, a) schemat obciążeń, b) i c) widok zastosowanego urządzenia

Podczas badania maszyna MTS ciągnęła obciążoną próbkę po poziomej, płaskiej i nieruchomej powierzchni utworzonej z płytki pilśniowej. Po osiągnięciu przez siłę wymuszającą ruchu wartości krytycznej, próbka zaczynała skokowo przesuwać się po powierzchni pilśni. Po każdym przesunięciu próbki siła spadała, malało naprężenie liny. Sytuacja taka powtarzała się za każdym razem, gdy siła wymuszająca ruch osiągała wartość krytyczną, zazwyczaj nieco większą niż poprzednia. Przebieg zmian siły wymuszającej ruch próbki

przedstawiono na wykresie Rys.8. W wyniku badań otrzymano wartości krytyczne sił wymuszających ruch próbki, wartość ekstremalna tej siły, wzięta w tej fazie badania, w której skokowe ruchy próbki stawały się regularne, była podstawą do wyznaczania współczynnika tarcia.



Rys. 8. Wyniki badań współczynnika tarcia, a) próbka 02 –  $T_{\max} = 1138$  kN, b) próbka 04 –  $T_{\max} = 748$  N

Wykonano 14 prób badania tarcia między pilśnią a gładką powierzchnią (zewnątrzni wygładzona powierzchnia płyty Pro-Monta) kostki gipsowej, oraz 7 prób między pilśnią a powierzchnią szorstką (otrzymaną po przecięciu próbki).

Równowaga sił pokazanych na Rys. 7 prowadzi do równania:

$$\mu(P_n - T \sin \varphi) = T \cos \varphi, \quad (3)$$

gdzie:  $T$  – maksymalna siła w linii ciągnącej próbkę, rejestrowana na urządzeniu MTS,  $P_n$  – siła nacisku  $P_n = 1,4$  kN,  $\varphi$  – oznacza kąt nachylenia liny do poziomu, nachylenie to w trakcie badań wynosiło 10 %, tzn.  $\tan \varphi = 0,1$ .

Po przekształceniach otrzymamy formułę do wyznaczenia współczynnika tarcia:

$$\mu = \frac{1}{\frac{P_n}{T} \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \varphi)^2} - \operatorname{tg} \varphi}. \quad (4)$$

Dla średnich sił tarcia  $T = 0,7792$  kN dla powierzchni gładkiej otrzymano wartości współczynnika tarcia  $\mu = 0,586$ . Dla powierzchni szorstkiej i siły  $T = 1,1761$  kN, otrzymano współczynnik  $\mu = 0,912$ .

## 6. Podsumowanie i wnioski

Wyznaczenie stałych materiałowych i weryfikacja modelu fizycznego i numerycznego jest niezwykle istotną częścią prawidłowo przeprowadzonej symulacji. Opisane w artykule badania stanowią przykład rozwiązania ważnego problemu określenia własności mechanicznych modelowanego materiału. Brak dostępnych danych pochodzących od producentów materiału lub rezultatów badań laboratoryjnych przeprowadzonych przez innych badaczy skłonił autorów do podjęcia tej tematyki.

Otrzymane wyniki pozwalają określić zakres możliwego zastosowania modelu liniowego oraz wskazują na ograniczenia symulacji posługujących się tym modelem. W dalszych pracach autorów podjęta będzie próba stworzenia modelu nieliniowego, który będzie charakteryzował się innymi własnościami przy ściskaniu i rozciąganiu. Konieczna także okazała się bardziej szczegółowa analiza geometrii modelu w skali „mezo”, uwzględniającej porowatość materiału, co daje nadzieję na wyjaśnienie silnie nieliniowej charakterystyki odkształcalności poprzecznej przy ściskaniu.

Autorzy wyrażają nadzieję, że rezultaty przedstawione w pracy będą przydatne dla innych badaczy pragnących podjąć tematykę materiału o zbliżonej do porowatego gipsu charakterystyce.

## Literatura

1. Chen C.S., Hsu S.C. *Measurement of indirect tensile strength of anisotropic rocks by the ring test*. Rock Mech. Rock Engng. 34(4) (2001) 293-321.
2. Jianhong Y., Wu F.Q., Sun J.Z. *Estimation of the tensile elastic modulus using Brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46 (2009) 568-576.
3. Aréoglu N., Girgin Z.C., Aréoglu E. *Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application in strength criterion*. ACI Materials Journal 103(1) (2006) 18-24.
4. Kourkoulis S.K., Markides Ch.F., Chatzistergos P.E. *The standardized Brazilian disc test as a contact problem*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 57 (2013) 132-141.
5. Kourkoulis S. K., Markides C.F., Pasiou E.D. *A combined analytic and experimental study of the displacement field in a circular ring*. Meccanica 50 (2015) 493-515.
6. Gontarz J., Podgórski J. *Wyznaczanie wytrzymałości na rozciąganie betonu i skał metodą "brazylijską" w konfrontacji z zastosowanym kryterium zniszczenia materiału*. Budownictwo i Architektura 13(2) (2014) 191-200.
7. Klin S. *Analiza zmienności wytrzymałości i odkształcalności gipsu w różnych stanach naprężeń i wilgotności*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, nr 510, Rozprawy CCXXVII, Wrocław 2005.

## The study of the mechanical properties of the porous gypsum

**Jakub Gontarz, Jerzy Podgórski**

*Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture,  
Lublin University of Technology, e-mail: j.gontarz@pollub.pl, j.podgorski@pollub.pl*

**Abstract:** The paper presents the laboratory test results of the mechanical properties of porous gypsum. Material for the study was obtained from gypsum Pro-Monta plate of 100mm thick. Based on the compression test of cubic samples, following mechanical properties were determined: compressive strength, Poisson's ratio and Young's modulus. Tensile strength was determined based on three-point bending test of rectangular cross section sample. Also a friction coefficients were investigated as follows: between the smoothed surface of the sample and a fiberboard pad, between a rough surfaces (after cutting) and fiberboard pad. A porosity of the material samples was determined using standard method. The material's mechanical property values can be useful for modeling destruction and deformation of a porous gypsum undertaken by analytical and numerical methods.

**Keywords:** Mechanical properties of gypsum, compressive strength, tensile strength, Young's modulus, Poisson's ratio, porous gypsum.